第38卷　第4期
2021年7月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 38　No. 4
Jul. 2021

基于生态系统服务价值的塔里木河干流土地利用结构优化

吝　静[1]，赵成义[1]，马晓飞[2]，施枫芝[2]，吴世新[2]，朱　建[3]

（1. 南京信息工程大学土地科学研究中心，江苏 南京　210044；2. 中国科学院新疆生态与地理研究所，新疆 乌鲁木齐　830011；3. 塔里木河流域管理局，新疆 库尔勒　841000）

摘　要： 通过研究塔里木河干流土地利用变化对生态系统服务价值的内在影响机制，基于生态系统服务价值优化了其土地利用结构。结果表明：(1) 应急生态输水后塔里木河干流耕地、林地、草地、荒漠、水体的年平均变化率分别为7.26%、2.68%、-1.90%、1.22%、0.08%，耕地、林地面积的增加主要来自草地，水体面积变化主要受来水量影响。(2) 1990—2015年应急生态输水使塔里木河下游生态系统服务价值呈"增长-减少-回升"的趋势，共增长2.99×10^8元；塔里木河干流整体呈现下降的趋势，共减少了39.60×10^8元。(3) 通径分析发现水体面积变化与塔里木河干流生态系统服务价值的内在联系最大，直接作用为0.610，间接作用为0.345。(4) 土地利用类型间转化关系发现，当耕地、林地、草地、荒漠、湿地面积占比分别为3.34%、10.03%、38.22%、45.95%、0.96%时，土地利用结构最优，对应的生态系统服务价值为533.69×10^8元。随着耕地面积的扩张，农业用水与生态用水矛盾突出，权衡土地利用结构及其耗水特征对于生态系统服务价值维护和水资源合理配置具有重要意义，可为探索塔里木河流域人地关系优化状态提供科学依据。

关键词： 土地利用变化；生态系统服务价值；土地利用结构优化；塔里木河干流

土地利用变化对生态系统服务价值的影响是联合国千年生态系统评估的热点问题之一[1-3]。各国学者在关注生态系统服务价值时空动态变化的基础上，更加注重土地利用结构对区域生态系统服务价值驱动力和内在联动机制的研究[4-7]。已有研究表明，土地利用变化通过改变生态水文过程，影响地球表层物质循环与能量交换以及地表生态系统的结构与功能，但目前仍缺乏土地利用变化对生态系统服务价值内在影响机制的认识[8-9]。塔里木河干流是中亚干旱区生态文明建设的天然廊道，也是内陆河流域人地关系状态的指示器。历史上随河道变迁及引水灌溉绿洲，塔里木河干流区土地利用结构历经"开荒-弃耕-再开荒-再弃耕"的剧烈变化，相应的以河道为中心的河岸植被随之发生脆弱演变，下游河道曾断流30多年，尾闾台特玛湖亦快速萎缩，直至干涸消亡。自2000年以来，塔里木河流域实行流域节水灌溉，向下游断流河道和尾闾干涸湖泊应急生态输水，人工重建河岸植被和台特玛湖。经过近30 a的努力，塔里木河干流经"下游生态输水，重建尾闾湖"生态系统服务功能成效显著，下游两岸的地下水埋深在2009—2017年平均抬升3.75 m，下游植被指数(NDVI)由0.05提升至0.15，河岸植被良性演变，尾闾台特玛湖水面面积达500 km^2[10]。随着区域环境剧烈变化，流域人口增长，社会经济可持续发展和生态文明建设的巨大需求，塔里木河干流区土地利用结构如何优化才能保持可持续的健康生态服务功能，人工干预"下游生态输水，重建尾闾湖"措施需要维持多久才能确保河岸植被生态不退化，尾闾湖泊维持多大水面面积才能保持最佳的生态服务功能？生态系统服务是连接自然环境与人类福祉的桥梁[1-2]，构建山水林田湖草生命共同体需要实现从单纯追求传统GDP(国内生

收稿日期： 2021-01-19；　**修订日期：** 2021-03-09
基金项目： 国家自然科学基金项目(41671030，XDA2006030201)
作者简介： 吝静(1995-)，女，硕士研究生，主要从事干旱区生态环境防治方面的研究. E-mail: LinjingX0228@163.com
通讯作者： 赵成义. E-mail: zhaocy@nuist.edu.cn

产总值),到兼顾考虑GEP(生态系统生产总值)的转变是当前国策,解决上述难题急需回答变化环境下土地利用变化对生态系统服务价值内在影响机制问题[11]。本文通过研究塔里木河干流应急生态输水前后土地利用结构和生态系统服务价值的时空动态变化特征,量化土地利用结构变化对生态系统服务功能的影响,探讨塔里木河干流生态系统服务价值的内在驱动力,基于生态系统服务价值优化土地利用结构,为探索塔里木河流域人地关系优化状态提供依据。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

塔里木河干流全长1321 km,分上、中、下游三段,阿拉尔至英巴扎为干流的上游段,河长495 km;英巴扎至恰拉的398 km为中游段,恰拉到尾闾台特玛湖的428 km为下游段(图1)。区域年均温约为10.6 °C,年均降水量不足80 mm,年均蒸发量大于2500 mm,气候炎热干燥、水资源匮乏,属暖温带极端干旱气候。土壤成土母质为沉积和风积物,土壤类型主要为风沙土、草甸土、潮土、盐土、龟裂土、湿地土等[12]。频繁变迁的塔里木河河道,形成了冲洪积平原地貌,河道两岸发育有以胡杨(*Populus euphratica*)、柽柳(*Tamarix ramosissima*)、芦苇(*Phragmites communis*)为主的乔灌草植被带。塔里木河自身不产流,主要依靠源流区补给,近30 a和田河、叶尔羌河和阿克苏河3条河流在阿拉尔断面汇流的多年平均径流量为43.3×10⁸ m³,低于塔里木河近期治理规划要求的46.5×10⁸ m³,特别在2007—2009年年均来水量减少到24.9×10⁸ m³,下游年均生态输水仅为0.8×10⁸ m³。干流区域总人口14.41×10⁵人,2018年地区生产总值36.31×10⁸元,经济支柱产业仍以农业为主,占比超过50%。受上游来水量条件制约,干流区上、中、下游人-地关系、人-地-生态关系矛盾突出,种植业、特色林果业、畜牧业发展不均衡,生态文明建设基础薄弱。

1.2 数据观测

沿塔里木河河道设置14个生态断面,每个断面距离河道0.1 km、0.5 km、0.9 km、1.4 km、3.5 km、6.5 km、9.5 km、12 km、16 km、25 km、26 km、27 km、28 km、29 km、30 km分别设置植物样方,样方大小为100 m×100 m,共计73个样方。每个样方再分16个25 m×25 m的小样方。记录每个样方内经纬度、海拔、物种类型、冠幅、树高、胸径、密度、盖度等。每个小样方内随机设置4个5 m×5 m的样方,记录样方内草本的物种名、密度、冠幅、高度等。

在植物样方调查时,沿河道设置98个地下水观测探孔,同步观测河道两岸地下水埋深变化,获得2009—2019年14个生态断面的地下水埋深变化数据。径流数据来自塔里木河流域干流管理局上游阿拉尔水文站、中游英巴扎水文站和下游恰拉水文

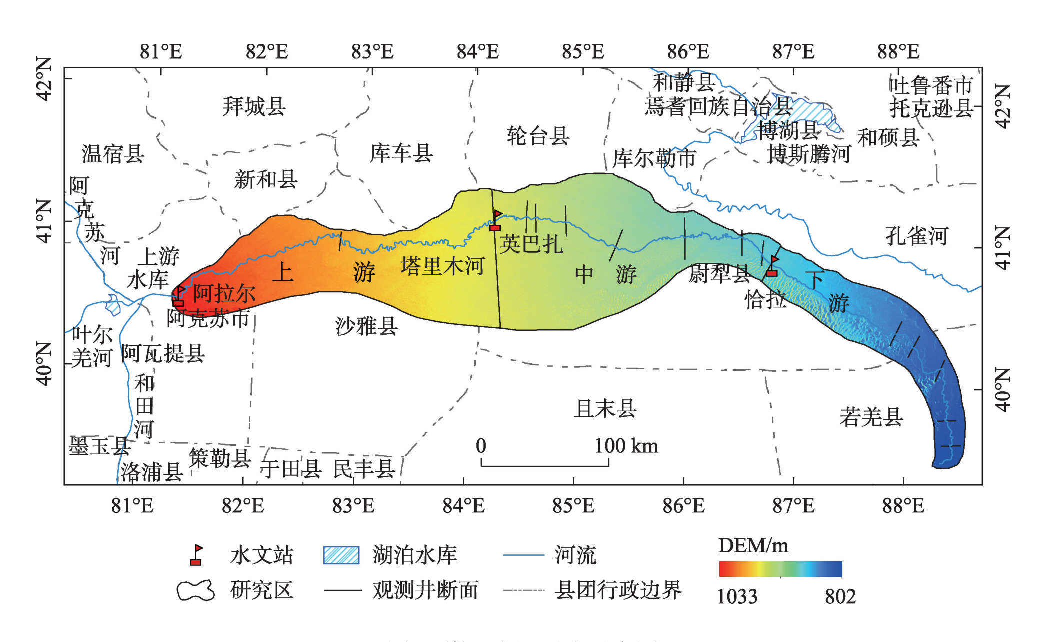


图1 塔里木河干流示意图

Fig. 1 Diagram of mainstream basin of Tarim River

站的实测序列数据。

土地利用类型数据主要采用全国第三次土地利用调查数据[13]，利用Landsat TM影像和Landsat OLI共5期遥感影像数据，构建近25 a塔里木河干流土地利用变化。社会经济发展数据采用《全国农产品成本收益资料汇编》和《新疆统计年鉴》数据。

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用变化分析 在全国第三次塔里木河干流土地利用调查数据的基础上，对1990年、2000年、2005年、2010年Landsat TM影像和2015年Landsat OLI影像数据通过辐射定标、大气校正、遥感影像解译和实测调查订正，构建了塔里木河干流耕地、林地、草地、荒漠、水体、湿地、建设用地7个土地利用类型序列变化数据(表1)。为保证分类精度，采用基于混淆矩阵精度检验的方法，利用Kappa系数对解译后的图像进行验证，验证结果显示5期遥感影像分类结果精度均达到了0.89以上，符合研究精度要求。

1.3.2 生态系统服务价值估算 生态系统服务价值(Ecosystem Service Value，ESV)的估算采用地理学与经济生态学相结合的生态系统服务价值当量因子法[14-15]，计算公式如下：

$$\mathrm{ESV}=\sum_{j=1}^{n}E_{rj}A_j \tag{1}$$

式中：ESV为生态系统服务价值量(元)；j为生态系统类型，n为生态系统类型的总个数；r为生态系统服务类型；E_{rj}为第j类生态系统第r种生态系统服务类型单位面积所生产出的价值量(元)；A_j表示第j类生态系统的面积(hm^2)。根据2005年新疆单位面积平均粮食产量得出1个标准当量因子的生态系统服务价值量每公顷为2831.05元。

1.3.3 土地利用变化对生态系统服务价值的影响分析 不同土地利用类型之间存在相互转变、相互影响的关系，为理清不同土地利用类型直接或间接对于ESV的影响，采用通径分析土地利用变化对塔里木河干流生态系统服务价值的影响。通径分析是在多元回归的基础上将相关系数加以分解，建立预测变量与目标变量之间的相关关系，直接或间接的分析自变量与因变量之间的相互作用关系，通过变量之间的通径系数直观的表达土地利用变化对生态系统服务价值的影响。通径系数是一个没有单位，具有方向性的相关系数，能够指示变量之间的作用关系。其公式如下：

$$r_{iy}=P_{iy}+r_{ij}P_{jy},\quad (i,j=1,2,\cdots,n) \tag{2}$$

式中：r_{iy}代表预测变量x_i和目标变量y之间相关系数；P_{iy}代表预测变量x_i和目标变量y之间的直接通径系数；P_{jy}代表预测变量x_j和目标变量y之间的直接通径系数；r_{ij}代表预测变量x_i和x_j之间的相关系数；$r_{ij}P_{iy}$代表预测变量x_i与目标变量y之间的间接通径系数。

1.3.4 土地利用结构优化 根据各土地利用类型之间的变化关系和生态系统服务价值变化，建立不同土地类型之间的回归方程[16]，计算不同土地利用结构下ESV的变化，确定塔里木河干流最优的土地利用结构：

$$y_i=b_0+b_1x+b_2x^2 \tag{3}$$

$$\mathrm{ESV}=\sum_{j=1}^{n}E_{rj}Fy_j \tag{4}$$

式中：x代表特定的一种土地利用类型面积占比(%)，y_i是代表除x外其他的不同土地利用类型的面积占比(%)，b_0、b_1、b_2为方程的系数，F为塔里木河干流的总面积。

2 结果与分析

2.1 塔里木河干流土地利用变化特征

2.1.1 土地利用时间变化 应急生态输水前(1990年)塔里木河干流土地利用类型面积占比排序为草地(45.72%)>荒漠(42.48%)>林地(6.94%)>耕地(2.43%)>水体(1.34%)>湿地(0.97%)>建设用地

表1 塔里木河干流土地利用分类体系

Tab. 1 Land use classification system in the mainstream of Tarim River

一级地类	二级地类	一级地类	二级地类
耕地	旱地、水浇地	水体	河渠、湖泊、水库
林地	有林地、灌木林地、疏林地、其他林地	湿地	湿地、滩涂
草地	高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地	建设用地	城镇用地、农村居民点用地、公交建设用地
荒漠	未利用地、盐碱地、沙地、戈壁、裸土地、石砾、其他		

(0.12%);应急生态输水后(2015年)各土地利用类型面积占比排序为荒漠(55.47%)>草地(24.04%)>林地(11.59%)>耕地(6.85%)>水体(1.37%)>湿地(0.55%)>建设用地(0.13%)。从土地利用类型面积变化来看(表2),25 a间草地面积变化最大,为−8876.67 km²,其次是荒漠(5320.58 km²)、林地(1902.94 km²)、耕地(1810.26 km²),建设用地变化最小,为4.01 km²。从土地利用类型面积变化率来看,耕地面积的变化率最大,为7.26%,其次是林地(2.68%)、草地(−1.90%),水体年均变化率最小为0.08%。上游段耕地、林地、水体变化较大,分别为1105.44 km²、1518.16 km²、−48.71 km²;中游段草地和荒漠变化较大,分别为−3976.51 km²、3311.08 km²。综上,塔里木河干流中游地区草地面积变化最大,上游地区耕地面积年均变率最大。

2.1.2　土地利用空间变化　从土地利用转移来看,1990—2000年塔里木河干流上游、中游、下游由草地转为林地的面积分别为739.03 km²、340.85 km²、110.85 km²;由草地转为耕地的面积分别为126.52 km²、75.51 km²、15.05 km²。应急生态输水后(2000—2015年),塔里木河干流上游、中游、下游地区草地转为林地的面积分别为995.46 km²、−72.65 km²、70.30 km²;草地转为耕地的面积分别为446.21 km²、293.02 km²、109.67 km²;在2000年生态输水以前,草地面积以329.33 km²·a⁻¹速度减少;塔里木河应急生态输水实施5 a后,2000—2005年草地面积减小速度趋缓,为208.6 km²·a⁻¹。受2007—2009年径流量和生态输水量持续减少的影响,2005—2010年草地变化速度增大,以849.32 km²·a⁻¹的速度减少。随着径流量和生态输水量增加,2010—2015年草地相对稳定,减少速度降低至58.72 km²·a⁻¹。综上,塔里木河干流上游地区主要表现为草地转为耕地,中游和下游地区主要表现为草地转为荒漠;受来水量的影响,2005—2010年的土地利用空间变化最大。

由图2可知,较林地、草地相比,耕地面积需水量更大且在时间上更集中,主要分布在河流、湖泊、

表2　1990—2015年塔里木河干流上游、中游、下游土地利用转移矩阵

Tab. 2　Land use transition matrix of upper, middle and lower reaches of Tarim River from 1990 to 2015　/km²

土地利用类型		耕地	林地	草地	水体	建设用地	荒漠	湿地	1990年
上游	耕地	511.57	36.01	48.63	1.73	26.41	1.40	0.12	625.86
	林地	153.95	660.68	288.63	45.43	0.35	188.98	16.51	1354.52
	草地	854.93	1880.78	2008.19	90.61	2.75	2105.48	15.04	6957.78
	水体	21.43	59.37	87.79	172.36	0.32	1.68	30.65	373.60
	建设用地	11.53	1.68	0.61	0.11	8.06	0.00	0.02	22.03
	荒漠	160.93	192.32	717.93	9.28	0.53	5273.95	2.96	6357.90
	湿地	16.95	41.85	16.51	5.38	0.00	0.63	1.06	82.38
	2015年	1731.30	2872.69	3168.29	324.90	38.42	7572.12	66.36	15774.07
中游	耕地	39.78	1.52	3.93	0.00	1.70	0.03	0.00	46.96
	林地	75.82	301.19	590.01	25.46	0.70	120.82	25.18	1139.19
	草地	443.35	916.30	3385.33	70.23	0.98	3795.70	67.08	8678.96
	水体	3.80	20.04	39.88	35.27	0.00	4.80	9.47	113.26
	建设用地	0.70	0.12	0.43	0.00	0.41	0.00	0.00	1.66
	荒漠	27.08	103.79	477.18	5.49	0.05	6271.17	11.41	6896.17
	湿地	22.14	30.06	205.69	17.26	0.00	14.73	20.21	310.09
	2015年	612.65	1373.03	4702.45	153.70	3.85	10207.26	133.35	17186.29
下游	耕地	263.38	16.63	33.52	0.75	4.17	4.82	0.87	324.14
	林地	12.36	182.04	96.38	3.24	0.18	50.01	4.49	348.71
	草地	160.43	255.90	1393.77	24.31	0.74	1236.93	15.32	3087.40
	水体	0.14	0.60	12.22	48.70	0.03	0.83	0.50	63.02
	建设用地	16.02	1.96	1.35	0.05	4.86	0.55	0.04	24.83
	荒漠	10.93	41.50	437.33	4.40	0.29	3646.26	3.42	4144.13
	湿地	0.00	1.01	2.16	0.60	0.00	0.00	0.00	3.77
	2015年	463.26	499.64	1976.72	82.06	10.26	4939.41	24.65	7996.01

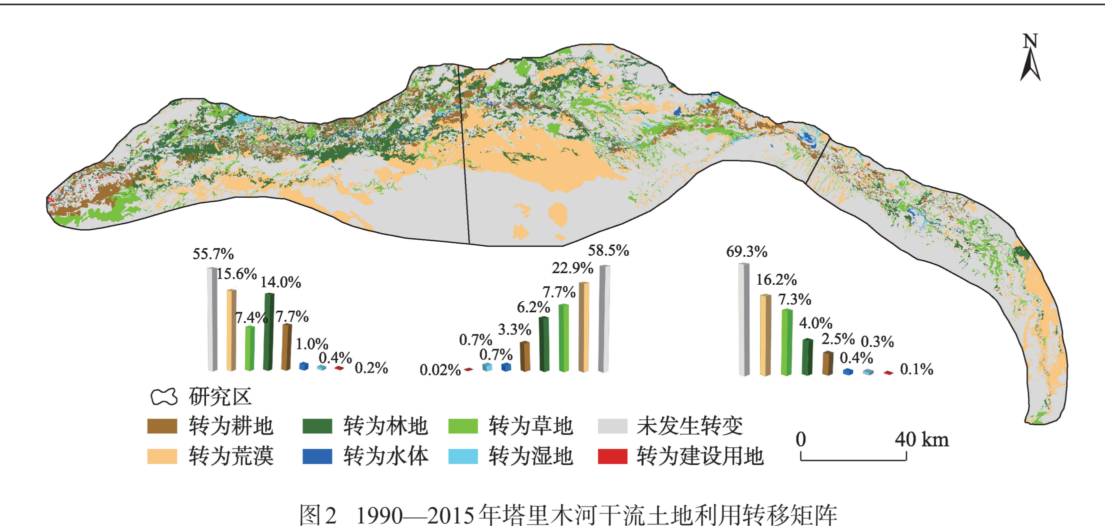


图2 1990—2015年塔里木河干流土地利用转移矩阵

Fig. 2 Land use transfer matrix of the mainstream of Tarim River from 1990 to 2015

水库等水资源丰富、便于灌溉的地区,面积扩张主要集中在上游阿拉尔地区,中游阿奇克至恰拉河道两侧;林地主要分布在地下水较为丰沛的地区,并以河道为中心向外扩张;草地在上、中游河道以南、下游河道以东地区面积退化严重,荒漠面积大幅扩张。

2.2 塔里木河干流生态系统服务价值时空变化特征

2.2.1 生态系统服务价值时间变化特征 应急生态输水之前(1990年),塔里木河干流ESV总量为670.09×10^8元,应急生态输水实施后(2000—2015年),2000年ESV较1990年增加了47.97×10^8元,2005年较2000年增加了0.84×10^8元,受到草地面积退化、湿地及水体面积减少等因素的影响,2010年较2005年减少了102.22×10^8元,2015年ESV有所回升,较2010增加了13.81×10^8元。受2005—2010年生态退化的影响,25 a来ESV共减少了39.60×10^8元。

土地利用结构不同,塔里木河干流生态系统服务价值明显不同。从图3可知,应急生态输水实施之前,草地的ESV最大为266.11×10^8元,其次是水体、林地,耕地ESV最小,为10.98×10^8元;应急生态输水实施后(2000—2015年),林地ESV最大为179.62×10^8元,其次是水体、草地。25 a间,草地ESV变化最大,共减少了126.15×10^8元,上、中、下游减少量占比分别为42.69%、44.80%、12.51%;林地ESV共增加了72.03×10^8元,上游增加量占总增量的79.78%;耕地ESV共增加了19.94×10^8元,上游增量占61.05%;水体ESV在上游地区减少了15.38×10^8元,在中、下游地区分别增加了12.77×10^8元、6.01×10^8元。从不同区域的时间变化分析可知,上游地区

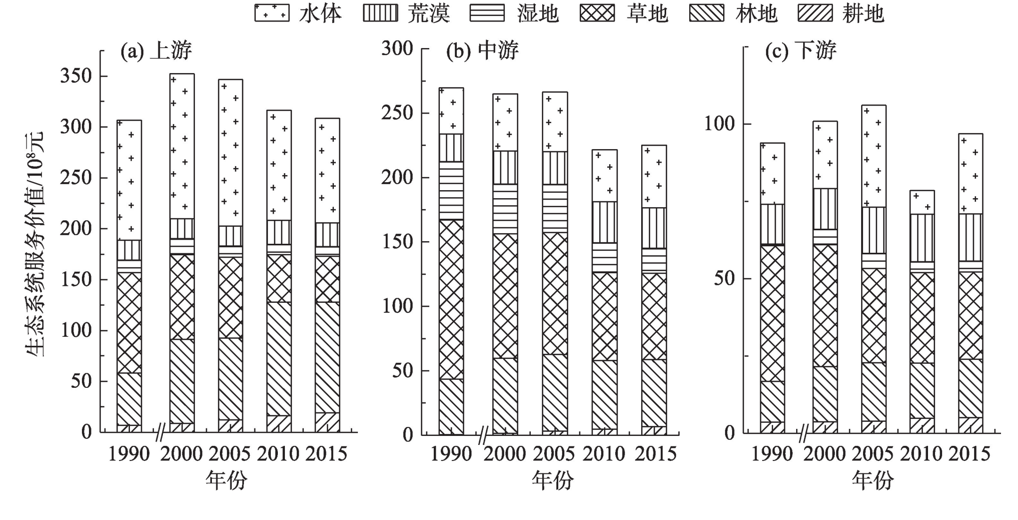


图3 1990—2015年塔里木河干流生态系统服务价值变化趋势

Fig. 3 Ecosystem service value of different land use types in the mainstream of Tarim River from 1990 to 2015

2000年ESV较1990年增加45.57×10⁸元后达到最大；2000—2015年由于林地、耕地ESV的增加量低于草地、湿地及水体ESV的减少量，使ESV降低了43.77×10⁸元；中游地区2010年达到近25 a来最低值，其中草地减少量最大为26.33×10⁸元；下游地区2010年ESV急剧下降，其中水体减少量最大为25.27×10⁸元。综上，上游ESV减少主要因为耕地面积增加，草地、湿地、水体面积的减少；中游地区主要因为草地面积减少；下游地区主要与水体面积变化有关。

2.2.2　生态系统服务价值空间变化特征　从图4可知，2005—2010年塔里木河干流ESV变化幅度最大，其中13.36%的面积表现为增加，21.64%表现为减少；2010—2015年，ESV最为稳定，仅有1.91%的面积发生了变化，1.20%的面积表现为增加。近25 a来ESV共减少了39.60×10⁸元，其中上游增加了1.80×10⁸元、中游减少了44.39×10⁸元、下游增加了2.99×10⁸元，中游地区ESV的减少是塔里木河干流ESV下降的重要因素。从ESV空间变率分析，恰拉水库区、台特玛湖等地区ESV变率较大，其次河道以北的变率要高于河道以南地区，并随着距河道距离的远近呈现规律性变化。总体上塔里木河干流地区在河流、水库等水资源相对丰沛的地区ESV变率较大，并沿其两岸变化量呈降低趋势。

2.3　土地利用变化对生态系统服务价值的影响

为理清土地利用变化对生态系统服务价值的影响，通过通径分析剖析了不同土地利用类型之间的相互作用关系对ESV的影响（表3）。结果表明，土地利用类型与ESV的关系为：$y=661.572-0.014x_{耕地}+0.024x_{林地}+0.319x_{湿地及水体}-0.013x_{荒漠}$（$R^2=0.89$，$P<0.01$），其中，水体对ESV的直接作用最大，达到0.61；水体除通过林地对ESV的间接作用表现为负值外，通过其他土地利用类型的间接作用均为正，总间接作用为0.32，表明塔里木河干流水体面积变化对于ESV的影响最大；林地对ESV的直接作用为0.39，但林地通过耕地、水体、荒漠对ESV的间接作用为−0.76，林地对ESV的间接作用大于直接作用是导致林地整体与ESV表现为负相关的直接原因。耕地和荒漠对ESV的直接作用、相关系数均为负值，说明了二者面积的增加对于ESV的增长具有反向作用。总的来

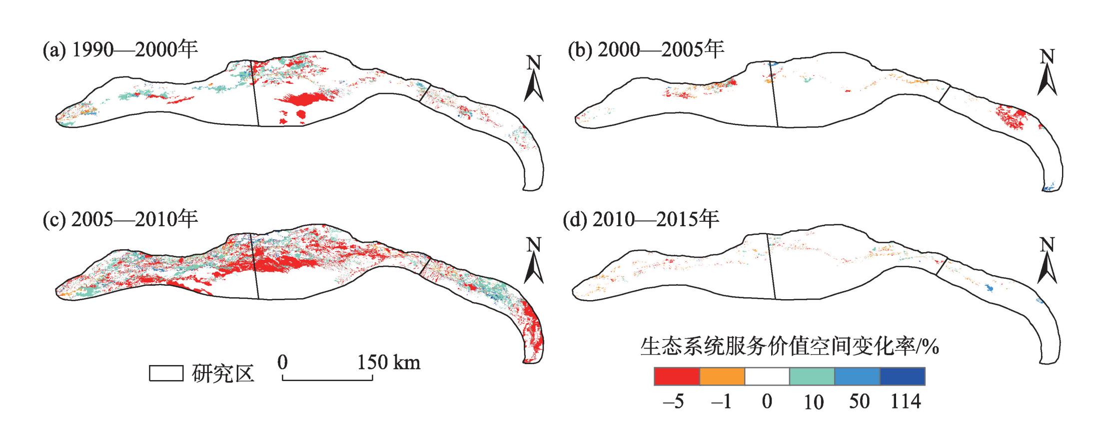


图4　塔里木河干流生态系统服务价值空间变率分析

Fig. 4　Spatial change of ecosystem service value on the mainstream of Tarim River

表3　土地利用对生态系统服务价值影响的通径分析

Tab. 3　Impact of land use on ecosystem services value through pass analysis

土地类型	直接作用	间接作用				相关系数
		耕地	林地	水体	荒漠	
耕地	−0.271	–	0.326	−0.221	−0.518	−0.684
林地	0.391	−0.226	–	−0.046	−0.485	−0.366
水体	0.610	0.098	−0.029	–	0.247	0.926**
荒漠	−0.541	−0.260	0.351	−0.279	–	−0.728

注：**表示$P<0.01$

讲，水体面积的变化与ESV的内在联系最大。

2.4 基于生态系统服务价值的土地利用结构优化

2.4.1 土地利用类型间的变化关系 近25 a来，水体面积占比不足总面积的2%，面积变化主要受来水量影响，与其他土地利用类型之间的转化关系较弱；林地、草地、耕地、湿地、荒漠面积占比之和为98%以上，其相互之间的面积转化关系较强，与草地之间的转化关系如图5所示。

从图5可知，草地面积变化与湿地呈正相关，与耕地、林地、荒漠呈负相关。当草地面积占比低于30%时，耕地面积占比将超过5%，荒漠面积占比超过50%；当草地面积占比超过40%时，荒漠面积占比在45.5%以下，河岸走廊生态环境好转，耕地面积占比将低于3%。当丰水年来水量增加时，湿地及水体面积增加，河水漫溢之处胡杨实生苗成活率高，乔灌草结构发育良好，植被生产力高；在远离河道的边缘区，河水补给地下水，地下水埋深抬升明显，胡杨密度、灌木和草本的盖度及丰富度均随地下水埋深抬升而增加，林地、草地面积增大，生态系统服务价值向好发展。当枯水期来水量减少时，湿地及水体面积减小，在保证耕地灌溉面积稳定的情况下开源节流，按最低生态需水量配置生态用水，减缓绿色走廊植被生态进一步退化。

2.4.2 土地利用结构优化 为了缓解塔里木河干流农业用水与生态用水的矛盾，在有限的来水量下，必须寻求土地利用结构优化与生态系统服务价值最大化在多维尺度上的协调和统一。土地利用结构优化后，塔里木河干流地区耕地、林地、草地、荒漠、湿地5种土地利用类型ESV由476.63×10⁸元，增加到533.69×10⁸元。由图5可知，耕地、林地、荒漠与草地之间面积变化呈现反比关系，合理权衡耕地与草地、林地与草地、荒漠与草地之间的关系有助于保障生态用地，促进区域经济效益与生态系统服务价值协同发展。经过土地利用结构优化后(表4)，林地面

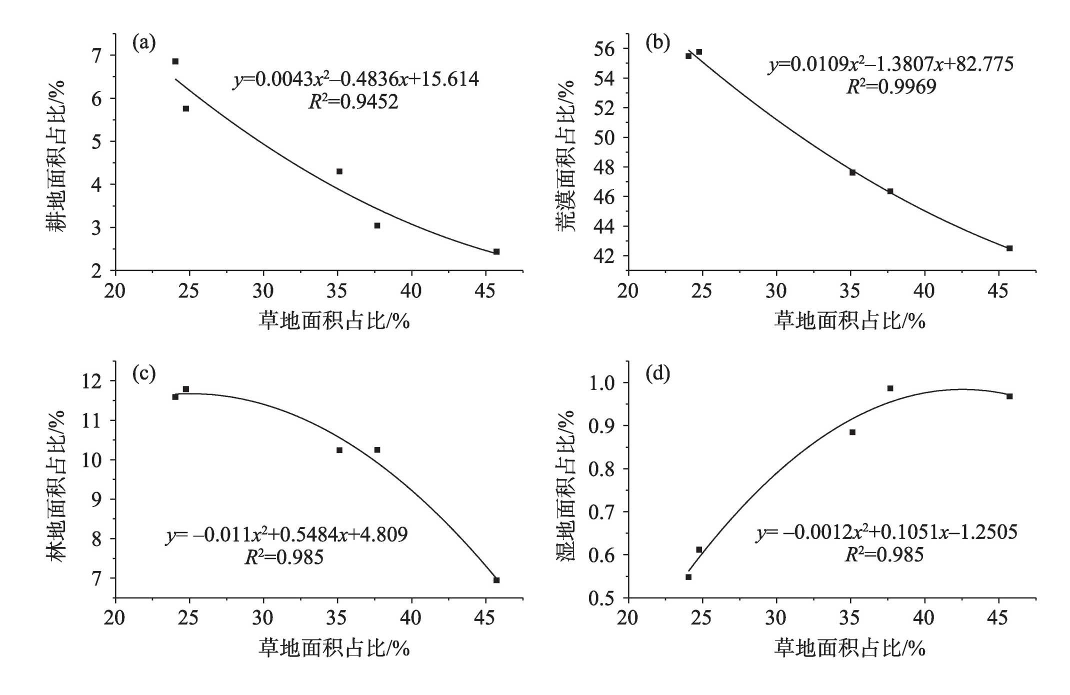


图5 塔里木河干流土地利用类型回归关系曲线

Fig. 5 Variation of annual runoff and ecosystem services value in the mainstream Tarim River

表4 塔里木河干流土地利用结构优化

Tab. 4 The optimization land use structure of the mainstream Tarim River

土地利用类型	2015年现状面积/km²	百分比/%	优化面积/km²	百分比/%	ESV变化量/10⁸元
耕地	2807.21	6.85	1367.94	3.34	−15.87
林地	4745.36	11.59	4109.09	10.03	−22.51
草地	9847.47	24.04	15653.53	38.22	82.51
荒漠	22718.78	55.47	18819.45	45.95	−12.03
湿地	224.36	0.55	393.18	0.96	24.95

积减少1.56%,草地面积增加14.18%,生态用地面积较2015年增加了5169.78 km²,ESV增加了57.05×10⁸元。本优化方案考虑到塔里木河干流农业用水与生态用水之间的矛盾,在满足粮食需求和永久基本农田保护下,实施退耕还林还草,故耕地面积降幅较大,土地利用优化结构整体上协调了农业用水与生态用水之间的矛盾,实现了塔里木河干流地区生态系统服务价值最大化,有助于提高绿色走廊生态环境质量。

3 讨 论

3.1 ESV内在驱动分析

土地利用变化是人类与生态环境共同作用的结果,亦是生态系统服务价值变化的一个重要因素。不合理的水资源利用导致20世纪50年代塔里木河干流区生态环境发生了巨变,为修复塔里木河下游退化生态,自2000年开始实施塔里木河下游应急生态输水工程。由表2和图3可知,近25 a来,塔里木河干流区水体面积占比在1.21%~1.72%,对ESV的贡献达到了25.90%~31.02%。应急生态输水使下游两岸的地下水埋深大幅抬升,NDVI由0.05提升至0.15,河岸植被良性演变,尾闾台特玛湖水面面积不断扩大,均与应急输水量大小、湿地及水体面积大小直接相关[17]。受2006—2009年上游来水量持续减少的影响,2010年ESV较2005年下降了102.22×10⁸元。基于通径分析的结果也表明湿地及水体对ESV的影响最大,表明塔里木河干流区水体对ESV具有显著影响。

根据图6可知,阿拉尔水文站1990—2005年平均径流量为43.26×10⁸ m³,2007—2009年径流量持续减少,年均径流量仅24.91×10⁸ m³,低于历史平均水平;2009年径流量仅有14.02×10⁸ m³,是25 a来最低水平。受径流量持续减少的影响,地下水水位大幅降低,恰拉站地下水埋深在2009年达到自有监测资料以来的最大值;2010年恰拉站随着径流量的增加,地下水水位明显抬升,2011—2013年来水量高于多年平均水平,地下水水位相对稳定并有一定程度回升,后随着2014年径流量的减少,中游、下游地区地下水水位又一次出现下降。

根据图7可知,干旱荒漠区胡杨幼苗的密度、乔灌草的盖度和丰富度随着地下水埋深的增加呈明显下降趋势。结合塔里木河干流径流量和地下水位变化的特征发现,随着塔里木河干流来水量的增加,地下水水位明显抬升,胡杨幼苗密度增加,乔灌草盖度和丰富度增加;“下游生态输水,重建尾闾湖”的生态服务功能成效显著,生态安全水平不断提高,由中度警示区提升至较安全区,河岸植被良性演变[18]。在研究期内,下游ESV呈现“增长-减少-回升”的趋势,这与径流量变化趋势和应急生态输水的效应相符,应急生态输水经历了显著增长(2000—2005年)、急剧减少(2006—2009年)和快速恢复(2010—2015年)的变化,凸显了干旱区水资源的人为利用调控对ESV的重要性[19]。

3.2 下游生态修复与土地利用结构优化的权衡分析

随着全球增温过程加剧,山区冰雪融化加速,山区径流量呈增加趋势,但因源流区绿洲灌溉面积扩大,农业耗水量增加明显,实际进入塔里木河干流的来水量并未增加[20],2012年源流区农业耗水量占流域总用水量的98%。有学者研究表明人工绿

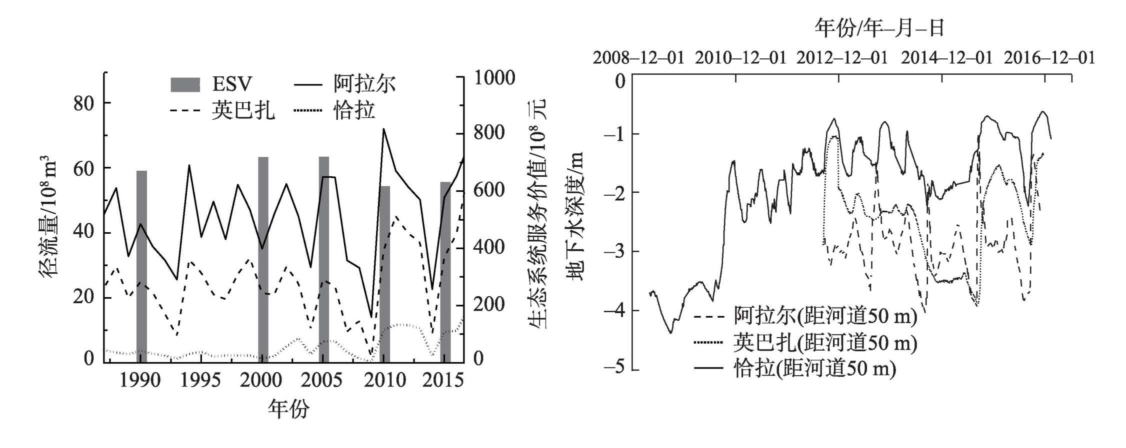


图6　塔里木河干流年径流量及生态系统服务价值变化和地下水埋深变化

Fig. 6　Variation of annual runoff and ecosystem services value and the depth of groundwater level in the mainstream Tarim River

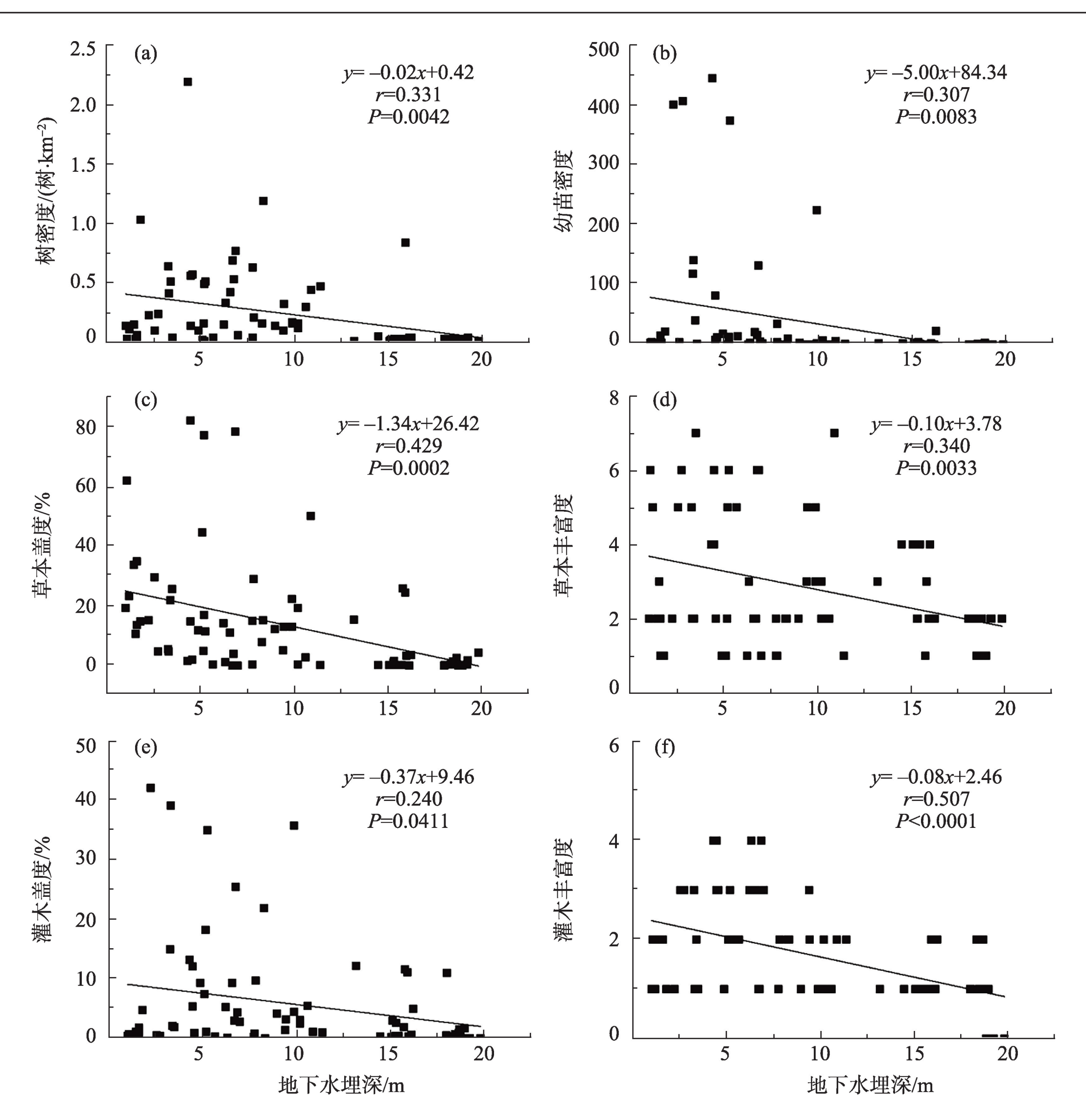


图7 不同生活型植物随地下水埋深的趋势变化

Fig. 7 Different life-forms with the trend of groundwater depth

洲耗水量是天然植被耗水量的2~3倍,下游生态修复面临更多挑战[21]。若将1×10⁸ m³水用于塔里木河下游耕地面积的扩张,将导致河道两侧地下水位平均下降1.01 m,沿河道两岸分布的乔灌草植物逐渐衰败,消耗等量水,林、草地生产的经济价值要高于耕地[22]。在相同用水量情况下,草地可固定的荒漠面积大于林地,在水资源匮乏的干旱区,权衡耕地、草地、林地的面积更有利于生态环境的修复。随着耕地面积的增加,生态用水与农业用水矛盾日渐突出,荒漠-绿洲过渡地带地下水位下降,自然植被衰退,生态系统结构受损是生态系统服务价值下降的主要原因[23]。

塔里木河干流湿地及水体面积缩小、耕地面积扩张,农业用水挤占生态用水是塔里木河干流生态环境问题恶化的主要原因。近25 a来粗犷式的农业发展方式已经破坏了塔里木河干流的生态系统,导致了生态环境的恶化[24]。土地利用结构的优化调整、生态水权管理机制的补充完善是塔里木河干流地区生态环境治理的重要措施。坚持"山水林田湖草"生命共同体,根据地下水埋深和光、热、土等自然条件,兼顾社会经济发展,确保粮食安全,遵循生态环境现状,严守资源环境底线,确定适宜耕种的农业生产区域,修正不适宜耕种区,发展节水集约化优势农业,提高单位水量的粮食产量,确保农业用水与生态用水平衡对于优化塔里木河干流地区土地利用结构,提高生态服务价值具有重要意义。

3.3 研究方法科学性

目前,生态系统服务评估主要包括两种类型,

一种是关注生态系统服务的经济价值的价值量评价方法[25],另一种是基于物质量的评价方法[26-27]。两种方法各有优势,价值量的估算方法更有利于比较不同时期、不同土地利用变化情景下生态系统服务变化的对比分析,并可以为生态系统恢复提供成本与效益分析,为可持续发展提供建议[28]。土地利用格局变化对生态系统服务有不同的影响。2020年中国生态学会系统回顾了中国近40 a来生态学发展的历程,概述了生态系统服务评估的模型和方法,从理论、方法、发展趋势等方面全面的评价了土地利用变化与生态系统服务之间的关系。傅伯杰等研究了黄土高原从坡顶到坡底林地-草地-坡耕地土地利用格局具有较高的生态系统服务价值[29-30]。渭干-库车河流域由于耕地面积扩张、草地退化,生态系统服务价值不断下降,环境日渐退化[31];江波等人动态评估了青海湖湿地生态系统服务价值的变化[32];综上,基于价值量的生态系统服务价值研究方法具有可靠性,计算结果可以反应干旱区土地利用变化所引起的生态系统服务价值量的变化。

4　结 论

(1) 近25 a塔里木河干流耕地、林地、草地、荒漠的年均变率分别为7.26%、2.68%、-1.90%、1.22%,年均变率最小的水体为0.08%。耕地变率最大且呈增加趋势;草地面积均呈连续减少趋势,水体面积在上游表现为减少,中游、下游均表现为增加。塔里木河干流上游地区主要表现为草地转为耕地,中游和下游地区主要表现为草地转为荒漠;受来水量的影响,2005—2010年土地利用时空变化最大。

(2) 塔里木河干流ESV呈减少趋势,共减少了39.60×10^8元,上、中、下游分别变化1.80×10^8元、-44.39×10^8元、2.99×10^8元。自2000年实施生态输水后,下游ESV总体呈现回升的态势。水资源对于干旱区生态系统服务价值的稳固和提升具有重要意义,通径分析发现水体与ESV的内在联系最大,直接作用为0.61,间接作用为0.32。塔里木河流域水资源综合治理成效显著,水资源统一调控对干旱区生态环境的修复具有积极作用。

(3) 随着耕地面积的扩张,农业用水与生态用水矛盾突出,权衡土地利用结构及其耗水特征对于生态系统服务价值维护和水资源合理配置具有重要意义。基于多年平均来水量计算草地、林地、耕地、荒漠、湿地面积占比分别为38.22%、10.03%、3.34%、45.95%、0.96%时土地利用结构最优,对应的生态系统服务价值最大为533.69×10^8元。为保证塔里木河流域生态系统服务价值的稳定,在枯水期实施最低生态需水量调控措施,均衡调控农业用水与生态用水比例;在丰水期,适当增加生态用水比例,扩大林地和草地面积以提高生态系统服务价值。

参考文献(References):

[1] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价 [J]. 应用生态学报, 1999, 10(5): 635-640. [Ouyang Zhiyun, Wang Rusong, Zhao Jingzhu. Ecosystem services and their economic valuation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1999, 10(5): 635-640.]

[2] Tansley A G. The use and abuse of vegetational concepts and terms [J]. Ecology, 1935, 16(3): 284-307.

[3] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well Being: Synthesis[M]. Washington: Island Press, 2005.

[4] Gao Jie, Li Feng, Gao Hui, et al. The impact of land-use change on water-related ecosystem services: A study of the Guishui River Basin, Beijing, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 163: 148-155.

[5] Meyfroidt P, Lambin E F, Erb K H, et al. Globalization of land use: Distant drivers of land change and geographic displacement of land use[J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2013, 5(5): 438-444.

[6] Sterling Shannon, Ducharne Agnès, Polcher Jan. The impact of global land-cover change on the terrestrial water cycle[J]. Nature Climate Change, 2013, 3(4): 385-390.

[7] Yang Wei, Jin Yuwan, Sun Tao, et al. Trade-off s among ecosystem services in coastal wetlands under the effects ofreclamation activities[J]. Ecological Indicators, 2018, 92: 354-366.

[8] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值[J]. 资源科学, 2015, 37(9): 1740-1746. [Xie Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Changshun, et al. The value of ecosystem services in China[J]. Resources Science, 2015, 37(9): 1740-1746.]

[9] Kubiszewski Ida, Costanza Robert, Anderson Sharolyn, et al. The future value of ecosystem services: Global scenarios and nationalimplications[J]. Ecosystem Services, 2017, 26: 289-301.

[10] 雍正, 赵成义, 施枫芝, 等. 近20年塔里木河干流区地下水埋深变化特征及其生态效应研究[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 182-189. [Yong Zheng, Zhao Chengyi, Shi Fengzhi, et al. Variation characteristics of groundwater depth and its ecological effect in the main stream of Tarim River in recent 20 years[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(3): 182-189.]

[11] 邓铭江, 樊自立, 徐海量, 等. 塔里木河流域生态功能区划研究[J]. 干旱区地理, 2017, 40(4): 705−717. [Deng Mingjiang, Fan Zili, Xu Hailiang, et al. Ecological function regionalization of Tarim River Basin[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(4): 705−717.]

[12] 施枫芝, 赵成义, 叶柏松, 等. 基于PTFs的干旱地区土壤饱和导水率的尺度扩展[J]. 中国沙漠, 2014, 34(6): 1584−1589. [Shi Fengzhi, Zhao Chengyi, Ye Baisong, et al. The scaling-up of soil saturated hydraulic conductivity based on PTFs in Arid Area[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(6): 1584−1589.]

[13] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J]. 地理学报, 2014, 69(1): 3−14. [Liu Jiyuan, Kuang Wenhui, Zhang Zengxiang, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(1): 3−14.]

[14] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243−1254. [Xie Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Leiming, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30 (8): 1243−1254.]

[15] Yuan Shaofeng, Zhu Congmou, Yang Lixia, et al. Responses of ecosystem servicesto urbanization-induced land use changesin ecologically sensitive suburban areas in Hangzhou, China[J]. Environmental Researchand Public Health, 2019, 16(7): 1124.

[16] 范金城, 梅长林. 数据分析[M]. 第二版. 北京: 科学出版社, 2010. [Fan Jincheng, Mei Changlin. Data Analysis[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2010.]

[17] Arowolo A O, Deng X Z, Olatunji O A, et al. Assessing changes in the value of ecosystem services in response toland-use/land-cover dynamics in Nigeria[J]. Science of the Total Environment, 2018, 636: 597−609.

[18] 李梦怡, 邓铭江, 凌红波, 等. 塔里木河下游水生态安全评价及驱动要素分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 39−47. [Li Mengyi, Deng Mingjiang, Ling Hongbo, et al. Evaluation of ecological water security and analysis of driving factors in the lower Tarim River, China[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 39−47.]

[19] Mamat Zulpiya, Halik Ümüt, Keyim Maierdang, et al. Variation of the floodplain forest ecosystem service value in the lower reaches of Tarim River, China[J]. Land Degradation & Development, 2018, 29(1): 47−57.

[20] Krysanova Valentina, Wortmann Michel, Bolch Tobias, et al. Analysis of current trends in climate parameters river discharge and glaciers in the Aksu River basin Central Asia[J]. Hydrological Sciences Journal, 2015, 60(4): 566−590.

[21] 张沛. 塔里木河流域社会−生态−水资源系统耦合研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019. [Zhang Pei. Research on the Coupling System of Society, Ecoenvironment and Water in Tarim River Basin[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019.]

[22] 郭宏伟, 徐海量, 凌红波, 等. 塔里木河下游耕地扩张与天然植被退化的定量关系初探[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(2): 226−233. [Guo Hongwei, Xu Hailiang, Ling Hongbo, et al. Quantitative relationship between cultivated land expansion and natural vegetation degradation in the lower reaches of the Tarim River[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(2): 226−233.]

[23] Rukundo Emmanuel, Liu Shiliang, Dong Yuhong, et al. Spatio-temporal dynamics of critical ecosystem services in response to agricultural expansion in Rwanda, East Africa[J]. Ecological Indicators, 2018, 89: 696−705.

[24] Lawler J J, Lewisb D, Nelson Erik, et al. Projected land-use change impacts on ecosystem services in the United States[J]. PNAS, 2014, 111(20): 7492−7497.

[25] 宁珊, 张正勇, 周孙武, 等. 基于生态服务价值的玛纳斯河流域土地利用结构优化[J]. 生态学报, 2019, 39(14): 5208−5217. [Ning Shan, Zhang Zhengyong, Zhou Hongwu, et al. Optimization of land use structure based on ecological service value in Manas River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(14): 5208−5217.]

[26] 刘冠, 李国庆, 李洁, 等. 基于InVEST模型的1999—2016年麻塔流域碳储量变化及空间格局研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38 (1): 267− 274. [Liu Guan, Li Guoqing, Li Jie, et al. Study on change in carbon storage and its spatial pattern in Mata Watershed from 1999 to 2016 based on InVEST model[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 267−274.]

[27] 王蓓, 赵军, 仲俊涛. 2005—2015年石羊河流域生态系统服务时空分异[J]. 干旱区研究, 2019, 36(2): 474−485. [Wang Bei, Zhao Jun, Zhong Juntao. Spatiotemporal differentiation of ecosystem services in the Shiyang River Basin from 2005 to 2015[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(2): 474−485.]

[28] 张舟, 吴次芳, 谭荣. 生态系统服务价值在土地利用变化研究中的应用: 瓶颈和展望 [J]. 应用生态学报, 2013, 24(2): 556−562. [Zhang Zhou, Wu Cifang, Tan Rong. Application of ecosystem service value in land use change research: Bottlenecks and prospects [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(2): 556−562.]

[29] Fu Bojie, Su changhong, Wei yongping, et al. Double counting in ecosystem services valuation: Causes and Countermeasures[J]. Ecological Research, 2010, 26(1): 1−14.

[30] Fu Bojie, Chen Liding, Ma Keming, et al. The relationships between land use and soil conditions in the hilly area of the Loess Plateau in northern Shaanxi, China[J]. Catena, 2000, 39(1): 69−78.

[31] 侯一峰, 汪洋, 张帅, 等. 新疆渭干−库车河流域土地利用变化空间耦合及其生态效应[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(6): 13−20. [Hou Yifeng, Wang Yang, Zhang Shuai, et al. Change in land use and its consequence for ecological systems in Weigan-Kuqa River Basin in Xinjiang[J]. Journal of Irrigation and Drainage 2020, 39 (6): 13−20.]

[32] 江波, 张路, 欧阳志云. 青海湖湿地生态系统服务价值评估[J]. 应用生态学报, 2015, 26(10): 3137−3144. [Jiang Bo, Zhang Lu, Ouyang Zhiyun, et al. Ecosystem services valuation of Qinghai Lake [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(10): 3137−3144.]

Optimization of land use structure based on ecosystem service value in the mainstream of Tarim river

LIN Jing[1], ZHAO Chengyi[1], MA Xiaofei[2], SHI Fengzhi[2], WU Shixin[2], ZHU Jian[3]

(1. Land Science Research Center, Nanjing University of Information Sciences and Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China; 2. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 3. Tarim River Basin Authority, Korla 841000, Xinjiang, China)

Abstract: In this study, the effect mechanism of land use and land cover change (LUCC) on ecosystem service value (ESV) in a complex environment was analyzed, and the land use structure was optimized based on ESV. The results showed that after the implementation of ecological water conveyance (EWC), the average annual variation rates of cultivated land, woodland, grassland, desert, water area in the mainstream of the Tarim River were 7.26%, 2.68%, −1.90%, 1.22% and 0.08%, respectively. The increase of cultivated land and woodland areas were mainly caused by grasslands, and the inflow of EWC increased the water areas. An increasing-decreasing-recovering tendency of time series in ESV with 299 million yuan in the lower reaches of the Tarim River was observed, and showed a decrease over all of the mainstream of Tarim River with 3.96 billion yuan. The water resources were of great significance to the stabilization and improvement of ESV in arid areas. Based on past analysis, the water area had the dominant influence on ESV, with the direct and indirect effects of 0.610 and 0.345, respectively. Based on the relationship between the different land use types, the optimal structure was calculated for the proportion of cultivated land, woodland, grassland, desert and wetland, which were 3.34%, 10.03%, 38.22%, 45.95%, and 0.96%, respectively. In this circumstance, the ESV can reach a maximum of 53.369 billion yuan. With the expansion of cultivated land areas, the contradiction between agricultural water consumption and ecological water utilization becomes more and more serious. It is of great significance to balance the characteristics of land use structure and water consumption for the maintenance of ESV and the rational allocation of water resources, which can provide a basis for exploring the optimal state of man-land relationships in the Tarim River Basin.

Keywords: Land use change; ecosystem service value; optimization of land structure; mainstream of Tarim River